

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)



REC'D 03 DEC 2003

WIPO

PCT

Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen:

102 46 658.0

Anmeldetag:

7. Oktober 2002

Anmelder/Inhaber:

Deutsche Telekom AG, Bonn/DE

Bezeichnung:

Vorrichtung und Verfahren zur Einstellung der
chromatischen Dispersion

IPC:

H 04 B 10/18

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 14. Juli 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Hiebinger

BEST AVAILABLE COPY



Vorrichtung und Verfahren zur Einstellung der chromatischen Dispersion

5 Beschreibung

Die Erfindung betrifft allgemein die Kompensation und Kontrolle der chromatischen Dispersion in optischen Systemen. Insbesondere betrifft die Erfindung eine Vorrichtung und
10 Verfahren zur Einstellung der chromatischen Dispersion.

Die chromatische Dispersion (CD) in optischen Fasern oder anderen optischen Komponenten ist ein verbreitetes physikalisches Phänomen, das allgemein bei der Übertragung
15 optischer Signale in dispersiven Medien auftritt.

In hochentwickelten optischen Übertragungssystemen wird die chromatische Dispersion, beispielsweise bei hohen Datenraten oder großen optischen Transparenzlängen als störender Effekt
20 relevant. Um die chromatische Dispersion, die entlang eines optisch transparenten Übertragungsweges akkumuliert wird, zu reduzieren, ist es bekannt, dispersionskompensierende Elemente in die Übertragungswege einzufügen. Unter anderem werden dazu dispersionskompensierende Fasern (DCFs) oder
25 Chirped Fibre Gratings eingesetzt.

Problematisch ist bei der Kompensation der chromatischen Dispersion jedoch, daß sie für eine gegebene Übertragungsstrecke im allgemeinen keinen konstanten Wert

04.07.03

aufweist, sondern vielmehr zeitlichen Änderungen unterliegt. Solche Änderungen werden neben anderen Umwelteinflüssen unter anderem auch durch Temperaturschwankungen ausgelöst, da die chromatische Dispersion optischer Komponenten, wie zum
5 Beispiel von Glasfasern temperaturabhängig ist.

Die Änderungen der chromatischen Dispersion sind relativ klein, so daß die durch sie bedingte Änderung der Signalqualität bei den zur Zeit installierten Übertragungssysteme im allgemeinen vernachlässigbar ist.
10

Bei neueren hochentwickelten Übertragungssystemen, etwa solchen mit Datenübertragungsraten oberhalb von 10Gbit/s oder sehr langen Übertragungswegen wirken sich diese Änderungen
15 allerdings bereits sehr störend auf die optische Signalqualität aus. Für derartige Übertragungssysteme werden Verfahren zur automatischen oder adaptiven Dispersionskompensation (ADC) daher als unbedingt notwendig erachtet.

Für eine ADC sind bereits erste Realisierungsvorschläge bekannt. Eine von K. Yamane in "New functionalities for advanced optical interfaces (dispersion compensation)", Workshop on IP/Optical in Chitose, Japan, 9. - 11. Juli 2002
25 vorgeschlagene Vorrichtung zur ADC basiert dabei auf einem optischen Zirkulator in Verbindung mit einer komplexen Freistrahloptik mit sechs teilweise mechanisch einstellbaren optischen Komponenten. Diese Lösung ist jedoch sehr aufwendig. Zudem ist deren Langzeitstabilität fragwürdig.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, die Kompensation der chromatische Dispersion zu vereinfachen. Diese Aufgabe wird bereits durch eine Vorrichtung gemäß
30

Anspruch 1, ein optisches Übertragungssystem gemäß Anspruch 9, sowie ein Verfahren gemäß Anspruch 16 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind Gegenstand der jeweiligen Unteransprüche.

5

Demgemäß umfaßt eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Einstellung der chromatischen Dispersion in einem optischen Übertragungssystem

10

- ein optisches Element mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion, sowie
- eine Einrichtung zur Einstellung einer Temperatur oder einer Temperaturverteilung zumindest eines Bereichs des optischen Elements zum Bereitstellen einer vordefinierten chromatischen Dispersion des optischen Elements.

15

Diese Einheit mit einem optischen Element mit temperaturabhängiger chromatischer Dispersion und einer Einrichtung zur Einstellung einer Temperatur oder einer Temperaturverteilung stellt dabei ein neuartiges Bauteil dar, welches im folgenden auch als OCET ("Optical Chromatic Dispersion Control Element using Temperature control") bezeichnet.

20

Es liegt außerdem im Rahmen der Erfindung, ein optisches Übertragungssystem anzugeben, welches erfindungsgemäß zumindest ein solches OCET aufweist, welches zwischen einem Sender und einem Empfänger im optischen Pfad des Übertragungssystems eingebaut ist, so daß Schwankungen der chromatischen Dispersion durch geeignete Einstellung des OCETs ausgeglichen werden können.

30

Der gleiche Effekt, welcher wesentlich zu zeitlichen Schwankungen der chromatischen Dispersion in optischen

04.07.03
4

Übertragungssystemen führt, nämlich die
Temperaturschwankungen, denen die optischen Elemente des
Übertragungssystems ausgesetzt sind, macht sich die Erfindung
also in überraschend einfacher Weise zunutze, um vorbestimmte
5 Werte der chromatischen Dispersion entlang der
Übertragungsstrecke einstellen zu können.

Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Einstellung der
chromatischen Dispersion in einem optischen
10 Übertragungssystem wird dazu eine vorbestimmte Temperatur
oder eine Temperaturverteilung zumindest eines Bereichs des
optischen Elements eingestellt, so daß das optische Element
eine vorbestimmte chromatische Dispersion aufweist.

15 Dabei kann die chromatische Dispersion des optischen Elements
durch Einstellung der Temperatur oder der
Temperaturverteilung bevorzugt so eingestellt werden, daß die
chromatische Dispersion der Übertragungsstrecke kompensiert
wird. Ebenso kann aber auch eine Einstellung der Dispersion
20 auf einem bestimmten Wert erreicht werden. Dies ist
beispielsweise dann sinnvoll, wenn zusätzliche Elemente zur
Kompensation der chromatischen Dispersion entlang des
optischen Pfades eingefügt werden. Außerdem kann mit einem
OCET die chromatische Dispersion des gesamten
25 Übertragungssystems auch gezielt auf einen von Null
verschiedenen Wert eingestellt oder ein Wertebereich
durchfahren oder durchgestimmt werden, um beispielsweise die
Toleranz des optischen Übertragungssystems gegenüber
Schwankungen der chromatischen Dispersion, beziehungsweise
30 den Einfluß solcher Schwankungen auf die Signal- und
Übertragungsqualität zu testen.

Vorteilhaft kann die Einrichtung zur Einstellung einer Temperatur oder Temperaturverteilung eine Temperaturkammer umfassen. Damit läßt sich die Umgebungstemperatur des optischen Elements einstellen, so daß die Temperaturdifferenz zwischen dem optischen Element und der Umgebung verschwindet. Auf diese Weise läßt sich die Temperatur oder die Temperaturverteilung des optischen Elements und damit das OCET gut stabilisieren.

10 In besonders einfacher und bevorzugter Weise läßt sich ferner die Temperatur des optischen Elements mittels einer Heizvorrichtung verändern. Vorteilhaft wird dabei das optische Element so ausgebildet, daß es bei Zimmertemperatur dann den zu erreichenden oder einzustellenden Wert der chromatischen Dispersion des Übertragungssystems überkompensiert, so daß bei entsprechender Temperaturerhöhung der gewünschte Wert erreicht werden kann. Vorteilhaft kann dazu das optische Element ein Material umfassen, welches einen Dispersionskoeffizienten aufweist, der ein gegenüber dem Dispersionskoeffizienten des optischen Übertragungssystems umgekehrtes Vorzeichen aufweist. Gerade durch die Verwendung eines solchen Materials kann dann eine Überkompensation erreicht werden.

25 Besonders leicht kann außerdem eine Einstellung einer vorbestimmten chromatischen Dispersion des optischen Elements dann erreicht werden, wenn das optische Element ein Material umfaßt, welches eine im wesentlichen monotone oder sogar lineare Abhängigkeit der chromatischen Dispersion von der Temperatur aufweist, so daß jeder chromatischen Dispersion innerhalb des einstellbaren Wertebereiches ein eindeutiger Temperaturwert zugeordnet werden kann.

04.07.03
6

Der Effekt der Temperaturabhängigkeit der chromatischen Dispersion ist, wie bereits oben erwähnt, nur sehr klein. Um eine hinreichend große Kompensation erreichen zu können, ist es daher von Vorteil, wenn das Licht einen möglichst langen Weg innerhalb des temperaturbeeinflussten Materials des optischen Elements zurücklegt. Dies kann besonders einfach dadurch erreicht werden, indem eine optische Faser, wie beispielsweise eine Glasfaser als optisches Element verwendet wird. Diese kann dann auch raumsparend aufgewickelt werden. Außerdem basieren optische Übertragungssysteme überwiegend auf der Signalübertragung durch Glasfasern. Bei derartigen Systemen kann die Kopplung der Übertragungsfasern dann mit der Glasfaser des OCET beispielsweise durch verlustarme Spleißung erfolgen.

Für eine Stabilisierung der eingestellten chromatischen Dispersion ist es insbesondere vorteilhaft, wenn die Einrichtung zur Einstellung zur Einstellung einer Temperatur oder Temperaturverteilung eine Thermostateinrichtung umfaßt, welche dafür sorgt, daß die eingestellten Temperaturen aufrechterhalten bleiben. Auch eine Einrichtung zur Messung der Umgebungstemperatur zumindest eines Abschnitts des optischen Elements kann vorteilhaft sein, um eine Regelgröße zur Temperaturstabilisierung bereitzustellen. Dies ist beispielsweise dann günstig, wenn eine Temperaturkammer eingesetzt wird, deren Innentemperatur einen guten und genauen Durchschnittswert für die Temperatur des in der Kammer angeordneten optischen Elements darstellt.

Besonders bevorzugt wird die chromatische Dispersion des OCETs nicht nur lediglich eingestellt, sondern auch gesteuert. Dazu umfaßt die Einrichtung zur Einstellung einer Temperatur oder Temperaturverteilung vorteilhaft eine

Temperatursteuerungseinrichtung. Zur Steuerung der Temperatur oder der Temperaturverteilung des optischen Elements können verschiedene Parameter verwendet werden, die von der Temperatursteuerungseinrichtung verarbeitet werden.

5

Um eine adaptive Dispersionskompensation oder Stabilisierung zu erreichen, wird bevorzugt die chromatische Dispersion im optischen Übertragungssystem oder einem Abschnitt desselben gemessen und die Temperatur oder Temperaturverteilung des optischen Elements des OCET in Abhängigkeit der Messung eingestellt. Dazu kann beispielsweise das OCET selbst eine Einrichtung zur Messung der chromatischen Dispersion umfassen, deren Meßwerte dann direkt zur Temperatursteuerung mit der Temperatursteuerungseinrichtung genutzt werden können.

15

Ebenso kann aber eine solche Meßeinrichtung auch Bestandteil des optischen Übertragungssystems außerhalb des OCET sein und die Meßwerte oder diesen entsprechende Signale an das OCET übergeben. Die Temperatursteuerungseinrichtung des OCETs kann dann die Temperatur in Abhängigkeit eines solchen Signals und damit die chromatische Dispersion von dessen optischen Element regeln.

20

Die Ermittlung der chromatischen Dispersion im optischen Übertragungssystem kann auch indirekt durch Messen der Temperatur an wenigstens einer Stelle im optischen Übertragungssystem durchgeführt werden, wenn die Abhängigkeit der chromatischen Dispersion im optischen Übertragungssystem von der Temperatur bekannt ist.

30

Eine Möglichkeit zur direkten Bestimmung der vorhandenen chromatischen Dispersion zumindest eines Abschnitts des

Übertragungssystems kann beispielsweise durch Einspeisen eines Testsignals mit einer entsprechenden Einrichtung und Auswerten des Testsignals erfolgen. Das Testsignal kann dann nach Durchlaufen zumindest eines Teils des

5 Übertragungssystems von einer Einrichtung zur Messung der chromatischen Dispersion ausgewertet werden. Geeignet hierfür ist insbesondere die Messung der differentiellen Phasenverschiebung wellenlängenmodulierter Testsignale.

10 Insbesondere bei langen Übertragungstrecken kann es auch vorteilhaft sein, wenn mehrere OCETs im Übertragungssystem angeordnet werden. Beispielsweise kann jeweils eine OCET in einem Abschnitt des Übertragungssystems zwischen zwei Verstärkern angeordnet werden. Werden demgemäß mehrere OCETs
15 entlang des optischen Pfades hintereinander angeordnet, so beeinflussen sich deren Einstellungen gegenseitig. Dementsprechend ist es von Vorteil, wenn die Temperatur oder Temperaturverteilung eines optischen Elements mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion in Abhängigkeit
20 von der Einstellung zumindest eines weiteren Elements mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion im optischen Übertragungssystem eingestellt wird, um die Einstellungen der optischen Elemente der OCETs aufeinander abzustimmen. Beispielsweise können die OCETs miteinander
25 vernetzt und so deren Einstellungen untereinander koordiniert werden. Dies kann vorteilhaft zum Beispiel über einen optischen Überwachungskanal geschehen. Vorteilhaft können die OCETs über einen solchen Überwachungskanal mit einer Recheneinrichtung zur Ermittlung der Einstellungen der
30 Vorrichtungen verbunden sein. Diese kann dann entsprechend den ermittelten günstigsten Einstellungen der OCETs über den Überwachungskanal die jeweiligen Einstellparameter übermitteln.

Oft sind, um höhere Übertragungsbandbreiten zu realisieren, mehrere Übertragungsfasern in einem optischen Übertragungssystem parallel geführt. Zeigen die einzelnen Zweige eines solche Übertragungssystems unterschiedliche Schwankungen in der chromatischen Dispersion, so können hier vorteilhaft mehrere OCETs parallel betrieben werden, welche eine individuelle Stabilisierung einzelner Zweige bereitstellen. Vielfach werden aber auch die Schwankungen der einzelnen Zweige im wesentlichen gleich sein, da beispielsweise bei einer durch Temperaturänderung ausgelösten Schwankung der Dispersion sich die Temperaturänderungen im wesentlichen entlang des optischen Pfades ergeben und zwischen den einzelnen Faser zumeist vernachlässigbar sind.

In diesem Fall ist eine Weiterbildung der erfindungsgemäßen Vorrichtung von Vorteil, bei welcher die OCET zumindest zwei optische Elemente mit separaten Ein- und Ausgängen umfaßt, die also nicht entlang eines optischen Pfades hintereinander angeordnet sind und die eine temperaturabhängige chromatische Dispersion aufweisen. Die chromatische Dispersion dieser Elemente kann dann mittels der Einrichtung zur Einstellung der Temperatur oder Temperaturverteilung zusammen durch eine gemeinsame Temperatureinstellung eingestellt werden.

Die Erfindung wird nachfolgend genauer anhand beispielhafter Ausführungsformen und unter Bezugnahme auf die beigelegten Zeichnungen dargestellt. Dabei verweisen gleiche Bezugszeichen auf gleiche oder ähnlichen Teile.

Es zeigen:

Fig. 1A bis 1C Beispiele optischer Übertragungsstrecken mit Stabilisierung oder Einstellung der



- Fig. 2 chromatischen Dispersion durch OCETs,
ein Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der
chromatischen Dispersion durch Messung von
differentieller Phasenverschiebung,
Fig. 3 eine schematische Darstellung eines
optisch transparenten Pfades
Fig. 4 eine Ausführungsform einer OCET mit
mehreren optischen Elementen, und
Fig. 5 eine weitere Ausführungsform einer
optischen Übertragungsstrecke.

In den Figuren 1A bis 1C sind verschiedene mögliche
Ausführungsbeispiele als ganzes mit 1 bezeichneter optischer
Übertragungsstrecken mit Verwendung von OCETs dargestellt,
5 die im folgenden beschrieben werden.

In Fig. 1A ist ein einfaches Ausführungsbeispiel einer
optischen Übertragungsstrecke 1 mit Stabilisierung der
chromatischen Dispersion durch ein OCET 11 gezeigt. Die
10 Übertragungsstrecke 1 umfaßt einen Sender 3, eine
Übertragungsfaser 5 und einen Empfänger 7. Der Empfänger 7
der optischen Übertragungsstrecke umfaßt einen Detektor 9 zur
Erfassung der übertragenen optischen Signale, sowie einen
optionalen optischen Verstärker 13, wie beispielsweise einen
15 Faserverstärker.

Zwischen dem optischen Verstärker 13 und dem Detektor ist ein
als Ganzes mit 15 bezeichnetes OCET im optischen Pfad
angeordnet. Das OCET umfaßt seinerseits ein optisches Element
20 mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion in
Form einer dispersionskompensierenden Faser 17, die innerhalb
einer Temperaturkammer 16 angeordnet ist, sowie eine
Einrichtung 19 zur Einstellung einer Temperatur oder einer

04.07.03
11

Temperaturverteilung zumindest eines Bereichs des optischen Elements, die im folgenden als Temperaturstelleinrichtung bezeichnet wird. Diese kann eine Heizvorrichtung zum Einstellen einer vordefinierten Temperatur innerhalb der Temperaturkammer umfassen. Durch Einstellung einer bestimmten Temperatur kann so eine vordefinierte chromatische Dispersion der dispersionskompensierenden Faser 15 bereitgestellt werden.

Die zwischen Sender 3 und Detektor 9 übermittelten optischen Datensignale unterliegen a priori keinen einschränkenden Randbedingungen. So können zum Beispiel optische Einkanal-Signale oder auch Mehrkanalsignale, beziehungsweise WDM-Signale (WDM="Wavelength Division Multiplexing") übertragen werden.

Die gesamte chromatische Dispersion $\langle D_{\text{tot}} \rangle$ zwischen Sender und Detektor setzt sich im wesentlichen aus den Dispersionsanteilen der Dispersion $\langle D_p \rangle$ der optischen Übertragungsfaser 5, der Dispersion $\langle D_{\text{OA}} \rangle$ des optischen Verrstärkers und der Dispersion $\langle D_c \rangle$ der dispersionskompensierenden Faser 17 des OCET 15 zusammen. Es gilt also:

$$(1) \quad \langle D_{\text{tot}} \rangle = \langle D_p \rangle + \langle D_{\text{OA}} \rangle + \langle D_c \rangle$$

Die gesamte chromatische Dispersion $\langle D_{\text{tot}} \rangle$ kann beispielsweise durch bei der Systeminstallation in den optischen Pfad eingefügte kompensierende Elemente auf einen akzeptablen Wert gesetzt werden, der eine hinreichend gute optische Signalqualität am Eingang des Detektors 9 ergibt.

Die Gleichung ist selbstverständlich beispielhaft zu verstehen, da eine optische Übertragungsstrecke auch andere, insbesondere auch mehr optische Elemente aufweisen kann, die temperaturabhängige chromatische Dispersion zeigen.

5

Die einzelnen Anteile der Dispersion können jedoch zeitlichen Schwankungen, $\langle \Delta D_p \rangle$, $\langle \Delta D_{OA} \rangle$ und $\langle \Delta D_c \rangle$ unterworfen sein, so daß sich eine im allgemeinen zeitabhängige Gesamtabweichung der chromatischen Dispersion

10

$$(2) \quad \langle \Delta D_{tot} \rangle = \langle \Delta D_p \rangle + \langle \Delta D_{OA} \rangle + \langle \Delta D_c \rangle$$

ergibt.

Die Schwankungen der chromatischen Dispersion der optischen Übertragungsfasern 5 und des optischen Verstärkers 13 werden in der Regel durch veränderte Umgebungsbedingungen hervorgerufen. Beispielsweise kann sich die Umgebungstemperatur einer oder mehrerer Komponenten, etwa zwischen Tag und Nacht oder Sommer und Winter ändern. Auch nicht temperaturbedingte Änderungen, etwa durch Schwankungen des mechanischen Stresses können zu Schwankungen der chromatischen Dispersion führen.

Die im allgemeinen zeitabhängigen Schwankungen $\langle \Delta D_p \rangle$ und $\langle \Delta D_{OA} \rangle$ der chromatischen Dispersion von optischer Übertragungsfasern und Verstärker können nun mit Hilfe der OCET 15 stabilisiert werden, indem die Temperatur der dispersionskompensierenden Fasern 17 mittels der Einrichtung 19 so eingestellt wird, daß gilt:

$$(3) \quad \langle \Delta D_c \rangle = -(\langle \Delta D_p \rangle + \langle \Delta D_{OA} \rangle),$$

so daß

$$(4) \quad \langle \Delta D_{\text{tot}} \rangle = 0$$

erreicht wird.

Die chromatische Dispersion kann dabei nicht nur stabilisiert werden, so daß der Wert von $\langle D_{\text{tot}} \rangle$ konstant ist. Vorteilhaft kann die chromatische Dispersion auf diese Weise auch kompensiert werden, so daß $\langle D_{\text{tot}} \rangle$ einen möglichst kleinen Wert annimmt oder sogar verschwindet.

Nachfolgend wird erläutert, wie die Temperatur eines optischen Elements einer OCET, wie insbesondere einer dispersionskompensierenden optischen Faser eingestellt werden kann, um eine vordefinierte chromatischen Dispersion des optischen Elements zu erreichen.

Die Änderung $\langle \Delta D \rangle$ der chromatischen Dispersion einer optischen Faser in Abhängigkeit der Temperaturänderung ΔT läßt sich in guter Näherung durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$(5) \quad \langle \Delta D \rangle = (dD/d\lambda) \cdot (d\lambda_0/dT) \cdot L \cdot \Delta T.$$

Dabei bezeichnet D den Dispersionskoeffizient, L die Länge der optischen Faser, λ die Wellenlänge und λ_0 die Nulldispersionswellenlänge. Diese Gleichung kann einfacher geschrieben werden als:

$$(6) \quad \langle \Delta D \rangle = S_0 \cdot M_0 \cdot L \cdot \Delta T.$$

Dabei ist $S_0 = (dD/d\lambda)$ die Steigung und $M_0 = (d\lambda_0/dT)$ der Temperaturkoeffizient der chromatischen Dispersion.

- 5 Bei einer Glasfaser mit gegebener Länge L sind also die Änderung $\langle \Delta D \rangle$ der chromatischen Dispersion und die Temperaturänderung ΔT näherungsweise proportional zueinander.

10 Im folgenden wird weiter gezeigt, wie eine Änderung der chromatischen Dispersion $\langle \Delta D_p \rangle$ einer optischen Übertragungsfasern mittels einer OCET ausgeglichen und so die chromatische Dispersion des Übertragungssystems stabilisiert werden kann. Der Index "P" kennzeichnet dabei Größen der Übertragungsfasern und der Index "C" Größen des optischen Elements der OCET am Beispiel einer dispersionskompensierenden Faser. Der Index "0" kennzeichnet ferner Anfangswerte.

Die Summendispersion $\langle \Delta D_{tot} \rangle$ beider Glasfasern soll auf einen Anfangswert

20

$$(7) \quad \langle D_{tot,0} \rangle = \langle D_{p,0} \rangle + \langle D_{c,0} \rangle$$

stabilisiert werden, so daß die Differenz zwischen momentaner Summendispersion $\langle D_{tot}(t) \rangle$ und anfänglicher Summendispersion $\langle D_{tot,0} \rangle$ auf Null geregelt wird. Anders ausgedrückt soll die Summe der Änderungen der chromatischen Dispersion beider Glasfasern gleich Null sein, also:

30

$$(8) \quad \langle \Delta D_p \rangle + \langle \Delta D_c \rangle = 0.$$

Aus Gleichung (6) ergibt sich daraus:

$$(9) \quad \Delta T_c = -\langle \Delta D_p \rangle / (S_{0,c} \cdot M_c \cdot L_c) .$$

Als dispersionskompensierendes optisches Element der OCET kann dazu jede Glasfaser verwendet werden, mit der die auftretenden Schwankungen $\langle \Delta D_p \rangle$ gemäß der Beziehung (9) durch Temperaturänderung nachgesteuert werden können.

##

Die gewünschte Summendispersion kann als reelles Vielfaches ε von $\langle \Delta D_p \rangle$ ausgedrückt werden, also durch $\langle D_{tot,0} \rangle = \varepsilon \cdot \langle \Delta D_{p,0} \rangle$.

Weiterhin ist die chromatischen Dispersion einer Glasfaser das Produkt aus Dispersionskoeffizienten D und Länge L , so daß gilt:

$$(10) \quad \langle D_{tot,0} \rangle = \varepsilon \cdot \langle \Delta D_{p,0} \rangle = D_p \cdot L_p + D_c \cdot L_c .$$

Mit D_p und D_c werden die Dispersionskoeffizienten der beiden optischen Fasern bezeichnet. Zusammen mit Gleichung (9) folgt daraus schließlich:

$$(11) \quad \Delta T_c = \Delta T_p \cdot (M_{0,p}/M_{0,c}) \cdot (D_c/S_{0,c}) \cdot ([1-\varepsilon]D_p/S_{0,p})^{-1} .$$

Für den Fall, daß keine Restdispersion vorliegen soll, so daß also $\langle D_{tot,0} \rangle = \varepsilon = 0$ gilt, geht Gleichung (11) über in

$$(12) \quad \Delta T_c = \Delta T_p \cdot (M_{0,p}/M_{0,c}) \cdot (D_c/S_{0,c}) \cdot (D_p/S_{0,p})^{-1} .$$

Soll eine Stabilisierung der chromatischen Dispersion einer optischen Übertragungsstrecke erreicht werden, so ist also die Temperatur gemäß Gleichung (12) einzustellen. Soll die Dispersion mittels einer OCET sogar kompensiert werden, so kann die Temperatur des optischen Elements der OCET gemäß Gleichung (12) eingestellt werden. Wird beispielsweise die

Temperatur der optischen Übertragungsfaser gemessen, so ergibt sich aus Gleichung (11), beziehungsweise Gleichung (12) eine bestimmte Temperaturdifferenz DT , welche die dispersionskompensierende Faser des OCETs zur Stabilisierung oder Kompensation der Dispersion aufweisen muß, so daß sich deren einzustellende Temperatur aus der Temperatur der optischen Übertragungsfaser plus der Temperaturdifferenz gemäß obigen Gleichungen errechnet.

Der Temperaturkoeffizient M_0 hängt vom Material des optischen Elements der OCET ab und liegt typischerweise zwischen $0,0026 \text{ nm}/^\circ\text{K}$ und $0,03 \text{ nm}/^\circ\text{K}$. Werte für Temperaturkoeffizienten geeigneter Materialien sind unter anderem in K.S.Kim et al., "Temperature dependence of chromatic dispersion in dispersion shifted fibers: experiment and analysis", Journal Appl. Phys. 73, Seiten 2069-2074, 1993 angegeben. Typische Werte für die Dispersionskoeffizienten D und die Steigungen S_0 um 1550 nm Wellenlänge sind in der nachstehenden Tabelle für Standard-Einmodenfasern und für einige Typen von dispersionskompensierenden Fasern gegeben:

	D [ps/(nm·km)]	S_0 [ps/(nm ² ·km)]	D/S_0 [nm]
Standard-Einmodenfaser	17	0,057	298
dispersionskompen- sierende Faser 1	-48,6	+0,053	-917
dispersionskompen- sierende Faser 2	-50,8	-0,154	330
dispersionskompen- sierende Faser 3	-100	-0,3	330

Die in der Tabelle angegebenen Werte für die Standard-
Einmodenfasern und die dispersionskompensierende Faser 3 sind
der oben aufgeführten Veröffentlichung von K.S.Kim et al. und
5 die Werte der beiden anderen dispersionskompensierenden
Fasern aus T.Kato, Y.Koyano, M.Nishimura, "Temperature
11 dependence of chromatic dispersion in various types of
optical fiber", Opt. Lett., Vol. 25, No. 16, Seiten 1156 -
1158, 2000 entnommen. Der Offenbarungsgehalt beider
10 Veröffentlichungen wird hiermit vollständig auch zum
Gegenstand der vorliegenden Erfindung gemacht.

Ändert sich die chromatische Dispersion der optischen
Komponenten häufig, so ist es von Vorteil, wenn die
15 Temperaturstelleinrichtung eine Temperatursteuerungs-
einrichtung umfaßt, bei welcher nicht lediglich ein fester
Wert der Temperatur der Faser 17 einstellbar ist, sondern die
zusätzlich deren Temperatur in Abhängigkeit von Meßgrößen
regelt. So kann insbesondere die chromatische Dispersion an
20 einem oder mehreren der in Fig. 1A eingezeichneten Meßpunkte
30, 31, 32 mit einer geeigneten Einrichtung gemessen werden.
Den Meßwerten entsprechende Signale können dann an die
Temperatursteuerungseinrichtung übergeben werden, welche die
Temperatur der dispersionskompensierenden Faser 17 dann in
25 Abhängigkeit von diesen Signalen einstellt.

Die chromatische Dispersion kann auch indirekt bestimmt
werden. Beispielsweise kann die chromatische Dispersion im
optischen Übertragungssystem 1 durch Messen der Temperatur an
30 wenigstens einem der Meßpunkte 20, 21, 22 im optischen
Übertragungssystem ermittelt werden. Aus einer
Kalibrierungsmessung können dann den Temperaturmeßwerten
jeweils eine chromatische Dispersion zugeordnet werden. Eine

solche Art der indirekten Messungen berücksichtigt selbstverständlich nur Änderungen der chromatischen Dispersion aufgrund von Temperaturschwankungen, denen die optischen Elemente des Übertragungssystems ausgesetzt sind.

5

Ein weiteres Ausführungsbeispiel einer dispersionsstabilisierten Übertragungsstrecke ist in Fig. 1B dargestellt. Bei diesem Ausführungsbeispiel umfaßt die Temperaturstelleinrichtung 19 der OCET eine Temperatursteuerungseinrichtung 21. Der Sender 3 umfaßt eine optische Signalquelle 4 zur Umsetzung von Daten in optische Signale, sowie einen Testsignal-Generator 23. Die Signale der optischen Signalquelle 4 und des Testsignal-Generators 23 werden mit einem Koppler 25 gekoppelt und zusammen über die optische Übertragungsfaser 5 gesendet. Der Testsignal-Generator erzeugt ein Testsignal, welches zur Messung der chromatischen Dispersion verwendet wird.

10

15

20

25

30

Der Empfänger 7 umfaßt in dieser Ausführungsform neben dem optischen Verstärker 13, der OCET 15 und dem Detektor 9 außerdem einen weiteren Koppler 29 zur Entkopplung des Testsignals und der optischen Datensignale. Die entkoppelten Datensignale werden weiter entlang des optischen Pfades über das OCET 15 zum Detektor 9 geleitet. Die Testsignale werden vom Koppler 29 an einen CD-Monitor, beziehungsweise eine Meßeinrichtung zur Messung der chromatischen Dispersion 27 geleitet, welcher anhand dieser Testsignale die chromatische Dispersion des zwischen Signalquelle 4 und Koppler 29 liegenden Abschnitts der Übertragungsstrecke bestimmt. Die Meßwerte können dann in entsprechende Signale umgesetzt werden, die an die Temperatursteuerungseinrichtung 21 übergeben werden, welche in Abhängigkeit dieser Signale, beziehungsweise den diesen entsprechenden Meßwerten die

Temperatur der Faser 17 einstellt, so daß diese eine bestimmte chromatische Dispersion aufweist.

Inbesondere geeignet zur Messung der chromatischen Dispersion mittels Testsignalen ist dabei das Verfahren der Messung der differentiellen Phasenverschiebung wellenlängenmodulierter Testsignale. Eine mögliche Anordnung zur Implementierung dieses Verfahrens in eine wie in Fig. 1B gezeigte Ausführungsform einer optischen Übertragungsstrecke ist dabei schematisch in Fig. 2 dargestellt. Dabei wird ein schmalbandiges Testsignal 102 um eine Mitten-Wellenlänge herum periodisch moduliert. Dies geschieht beispielsweise, indem ein breitbandigeres Testsignal 100 durch einen modulierten Filter oder einen Modulator 105, wie beispielsweise ein oszillierendes Gitter gefiltert wird. Dieses Testsignal 102 wird dann zusammen mit einem Referenzsignal 101 über den Koppler 25 in die Übertragungsstrecke eingekoppelt. Beide Signale sind außerdem in geeigneter Weise zeitlich moduliert. Bevorzugt umfassen dazu die Signale eine Abfolge von Impulsen, wie insbesondere von Rechteckimpulsen.

Bei der Übertragung dieser Signale ergibt sich aufgrund der chromatischen Dispersion dann eine Änderung der relativen zeitlichen Lage der Impulse von Testsignal 102 und Referenzsignal 101, die sich als Phasenverschiebung zwischen den Impulsen äußert. Diese kann dann vom CD-Monitor 27 mit hoher Genauigkeit mittels eines synchronisierten Verstärkers, beziehungsweise Lock-in-Verstärker 109 erfaßt werden. Aus einer solchen Phasenverschiebung $\Delta\Phi$ ergibt sich dann der Wert der chromatischen Dispersion zur Mittenwellenlänge des Testsignals.

Das Lock-In-Verfahren erfordert jedoch eine Synchronisation zwischen Testsignal-Generator und CD-Monitor. Um die Phasenverschiebung synchronisiert messen zu können, wird die Modulationsfrequenz und Modulationsphase vom Lock-In-Verstärker, beispielsweise in Form eines der Modulation des Testsignals entsprechenden Signals benötigt. Dazu umfaßt der Testsignal-Generator 23 beispielsweise einen Modulationsfrequenz-Generator 103. Mit der vom Modulationsfrequenz-Generator 103 erzeugten Modulationsfrequenz wird dann der Modulator 105 gesteuert, beziehungsweise das schmalbandige Testsignal 102 moduliert. Gleichzeitig wird die Modulationsfrequenz des Generators 103 über einen optischen Überwachungskanal 107 an den Lock-in-Verstärker übertragen. Der Überwachungskanal 107 kann dabei aufgrund des geringen Informationsgehaltes sehr schmalbandig ausgelegt sein. Der Überwachungskanal kann über eine getrennte Leitung realisiert werden, kann aber ebenso auch als schmalbandiges Frequenzband über die optische Übertragungsleitung übertragen werden.

Aus diesen Messungen kann dann ein geeignetes, der chromatischen Dispersion entsprechendes Signal generiert werden, welches an die Temperatursteuerungseinrichtung des OCET übertragen wird.

Geeignet zur Bestimmung der chromatischen Dispersion mit Hilfe von Testsignalen sind unter anderem auch OTDR-Messungen (OTDR="Optical Time Domain Reflectometry") oder Laufzeit-Photonenzählung. Beide Verfahren basieren auf Laufzeitmessungen optischer Signale.

Fig. 1C zeigt ein weiter verallgemeinertes Ausführungsbeispiel einer optischen Übertragungsstrecke 1.

Hier weist der Empfänger 7 zwei optisch transparente Elemente 40 und 41 auf, von denen entlang des optischen Pfades ein Element 40 vor und das weitere Element 41 hinter dem OCET angeordnet ist. Selbstverständlich kann beispielsweise eines
5 der Elemente 40, 41 auch einen optischen Verstärker umfassen.

Als optisch transparente Elemente werden beliebige optische Elemente verstanden, in denen ein optisches Signal optisch transparent transportiert oder verarbeitet wird. Beispiele
10 solcher optisch transparenter Elemente sind optische Verstärker, optische Multiplexer und Demultiplexer, optische Filter, optische Add/Drop-Multiplexer und Glasfaserelemente, sowie auch Kombinationen aus solchen Elementen. Ebenso stellt
15 selbstverständlich eine erfindungsgemäße OCET ein solches optisch transparentes Element dar. Jedenfalls unterliegen optische Signale, welche optisch transparente Elemente durchlaufen, der chromatischen Dispersion des transparenten oder teilweise Materials diese Elemente.

20 Dementsprechend kann ein OCET die chromatische Dispersion eines beliebigen optischen Pfades, wie er beispielsweise in Fig. 3 dargestellt ist, innerhalb eines gewissen Bereichs auftretender Schwankungen der Dispersion stabilisieren. Ein optisch transparenter Pfad, wie er in Fig. 3 gezeigt ist,
25 umfaßt eine Anordnung aufeinanderfolgender optisch transparenter Elemente 40, 41, ..., 4N und Übertragungsfasern 51, 52, ..., 5N. Die Dispersion kann an einem oder mehreren der Meßpunkte 50, 51, ... 5N bestimmt werden.

30 Generell kann eine Übertragungsfaser außerdem aus mehreren hintereinander angeordneten Fasern zusammengesetzt sein, die auch unterschiedliche Materialien umfassen und damit auch unterschiedliche chromatische Dispersionen aufweisen können.

Fig. 4 zeigt eine weitere Ausführungsform einer OCET 15. Diese zeichnet sich dadurch aus, daß sie mehr als ein dispersionskompensierendes optisches Element aufweist. Die in Fig. 4 dargestellte beispielhafte Ausführungsform weist diesbezüglich zwei dispersionskomensierende Faser 171, 172 auf. Die Fasern 171 und 172 weisen jeweils separate Eingänge 151, 152 und Ausgänge 154, 155 auf, die an einzelne parallele Zweige eines optischen Übertragungssystems anschließbar sind. Die Faser 171 und 172 sind in einer gemeinsamen Temperaturkammer 16 untergebracht. Die Temperatur in der Temperaturkammer 16 kann dann durch die Temperaturstelleinrichtung 19 mittels der Heizeinrichtung 156 eingestellt werden. Auf diese Weise werden die Temperaturen beider Fasern 171 und 172 gemeinsam eingestellt. Eine derartige OCET kann so in einfacher Weise die chromatische Dispersion mehrerer paralleler Zweige eines optischen Übertragungssystems gleichzeitig stabilisieren.

Im folgenden wird Bezug auf Fig. 5 genommen, welche eine weitere beispielhafte Ausführungsform eines dispersionsstabilisierten optischen Übertragungssystems, beziehungsweise einer Übertragungsstrecke 1 zeigt.

Diese Ausführungsform umfaßt mehrere optische Netzwerkelemente 60, 62, ..., die zwischen Sender 3 und Empfänger 7 entlang des optischen Übertragungspfades zwischen optischen Übertragungsfasern 51, 52, ..., 5N angeordnet sind.

Die optischen Netzelemente 60, 62, ... umfassen ihrerseits jeweils wieder ein oder mehrere optisch transparente Elemente. Die Netzwerkelemente, sowie der Empfänger 7 umfassen außerdem jeweils eine OCET 15. Die hier dargestellte

Ausführungsform der OCET umfaßt neben einer Temperatursteuerungseinrichtung 21 außerdem einen CD-Monitor 27, welcher die chromatische Dispersion jeweils an einem der zugeordneten Meßpunkte 30, 31,...3N bestimmt.

5 Selbstverständlich können die CD-Monitore 27 auch, ähnlich wie in Fig. 1B angedeutet ist, als separate Komponenten angeordnet sein. Die Temperatursteuerungseinheiten 21 der OCETs 15 sind untereinander über einen optischen Kontrollkanal oder optischen Überwachungskanal 107
10 miteinander vernetzt. Der optische Überwachungskanal 107 ist dazu bevorzugt bidirektional ausgelegt und kann beispielsweise auch über eine Telefonstandverbindung oder eine IP-Verbindung realisiert werden.

15 Zu den von den jeweiligen CD-Monitoren bestimmten Meßwerten der chromatischen Dispersion kommen hier als Eingangsparameter für die Temperatursteuerungen 21 so außerdem die über den optischen Überwachungskanal übertragenen Einstellungen der anderen OCETs hinzu.

20 Vorteilhaft ist auch eine dazu ähnliche Ausführungsform, bei welcher die von den jeweiligen CD-Monitoren 27 ermittelten Meßwerte der chromatischen Dispersion über den an eine zentrale Recheneinrichtung 158 übermittelt werden. Diese kann dann die günstigsten Einstellungen der OCETs ermitteln und
25 diesen Einstellungen entsprechende Signale an die OCETs 15 über den optischen Überwachungskanal 107 rückübermitteln.

Bezugszeichenliste

1	optische Übertragungsstrecke
3	Sender
4	optische Signalquelle
5, 50,	Übertragungsfaser
7	Empfänger
9	Detektor
13	optischer Verstärker
15	OCET
16	Temperaturkammer
17, 171, 172	dispersionskompensierende Faser
19	Einrichtung zur Einstellung einer Temperatur
21	Temperatursteuerungseinrichtung
23	Testsignal-Generator
25, 29	Koppler
27	Monitoreinrichtung
30 - 3N	Meßpunkte zur Messung der chromatischen
40, 41, ...4N	Optisch transparentes Element
100	Breitbandiges Testsignal
101	Referenzsignal
102	Schmalbandiges Testsignal
103	Modulationsfrequenz-Generators
105	Modulator
107	optischer Überwachungskanal
109	Lock-In-Verstärker
151, 152	optische Eingänge von 15
154, 155	optische Ausgänge von 15
156	Heizvorrichtung
60, 62	optische Netzelemente
158	Recheneinrichtung

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Einstellung der chromatischen Dispersion in einem optischen Übertragungssystem (1), welche
5 -ein optisches Element mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion, sowie
-eine Einrichtung (19) zur Einstellung einer Temperatur oder einer Temperaturverteilung zumindest eines Bereichs des optischen Elements zum Bereitstellen einer
10 vordefinierten chromatischen Dispersion des optischen Elements aufweist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element ein Material umfaßt, welches eine im
15 wesentlichen monotone Abhängigkeit der chromatischen Dispersion von dessen Temperatur aufweist.
3. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element ein Material
20 umfaßt, welches einen Dispersionskoeffizienten aufweist, der ein gegenüber dem Dispersionskoeffizienten des optischen Übertragungssystems umgekehrtes Vorzeichen aufweist.
- 25 4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element eine optische Faser (17), insbesondere eine Glasfaser umfaßt.
- 30 5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Einstellung einer Temperatur oder Temperaturverteilung eine Temperatursteuerungseinrichtung (21) umfaßt.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatursteuerungseinrichtung (21) eine Thermostateinrichtung umfaßt.

5 7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (27) zur Messung der chromatischen Dispersion.

10 8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, gekennzeichnet, durch zumindest zwei optische Elemente mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion, welche separaten Eingängen (151, 152) und Ausgängen (154, 155) zugeordnet sind, mit einer gemeinsamen Einrichtung (19) zur Einstellung einer gemeinsamen Temperatur oder
15 Temperaturverteilung zumindest eines Bereichs der optischen Elemente (17).

20 9. Optisches Übertragungssystem (1), umfassend zumindest eine entlang des optischen Pfades zwischen einem Sender und einem Empfänger angeordneten Vorrichtung (15) zur Einstellung der chromatischen Dispersion des optischen Übertragungssystems (1), insbesondere gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, welche
25 -ein optisches Element (17) mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion, sowie
-eine Einrichtung (19) zur Einstellung einer Temperatur oder einer Temperaturverteilung zumindest eines Bereichs des optischen Elements (17) zum Bereitstellen einer vordefinierten chromatischen Dispersion des optischen
30 Elements aufweist.

10. Optisches Übertragungssystem nach Anspruch 9, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (23, 25) zur

Einspeisung eines Testsignals zur Messung der chromatischen Dispersion.

- 5 11. Optisches Übertragungssystem nach Anspruch 9 oder 10, gekennzeichnet durch zumindest eine Einrichtung (27) zur Messung der chromatischen Dispersion im Übertragungssystem.
- 10 12. Optisches Übertragungssystem nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorrichtung (15) zur Einstellung der chromatischen Dispersion des optischen Übertragungssystems eine Temperatursteuerungseinrichtung (21) umfaßt.
- 15 13. Optisches Übertragungssystem nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatursteuerungseinrichtung (21) die Temperatur in Abhängigkeit eines Signals regelt, welches einem Meßwert der chromatischen Dispersion entspricht.
- 20 14. Optisches Übertragungssystem nach einem der Ansprüche 9 bis 13, wobei zumindest zwei entlang des optischen Pfades hintereinander angeordneten Vorrichtungen zur Einstellung der chromatischen Dispersion des optischen Übertragungssystems über einen optischen Überwachungskanal (107) miteinander verbunden sind.
- 25 15. Optisches Übertragungssystem nach einem der Ansprüche 9 bis 14, wobei zumindest zwei entlang des optischen Pfades hintereinander angeordnete Vorrichtungen zur Einstellung der chromatischen Dispersion des optischen Übertragungssystems über einen optischen Überwachungskanal (107) mit einer Recheneinrichtung (153)
- 30

zur Ermittlung der Einstellungen der Vorrichtungen verbunden sind.

- 5 16. Verfahren zur Einstellung der chromatischen Dispersion in einem optischen Übertragungssystem (1) insbesondere gemäß einem der Ansprüche 9 bis 15, wobei eine vorbestimmte Temperatur oder Temperaturverteilung zumindest eines Bereichs eines optischen Elements (17) eingestellt wird, so daß das optische Element eine vorbestimmte
- 10 chromatische Dispersion aufweist.
17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die chromatische Dispersion im optischen Übertragungssystem gemessen und die Temperatur oder
- 15 Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Messung eingestellt wird.
18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, daß die chromatische Dispersion im optischen Übertragungssystem (1) durch Messen der
- 20 Temperatur an wenigstens einer Stelle (30 - 34) im optischen Übertragungssystem (1) ermittelt wird.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur oder
- 25 Temperaturverteilung des optischen Elements (17) so eingestellt wird, daß die chromatische Dispersion des optischen Übertragungssystems (1) kompensiert wird.
- 30 20. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur oder Temperaturverteilung eines optischen Elements (17) mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion in

Abhängigkeit von der Einstellung zumindest eines weiteren Elements mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion im optischen Übertragungssystem eingestellt wird.

5

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß die chromatische Dispersion zumindest eines Abschnitts des optischen Übertragungssystems durch Einspeisen und Auswerten eines Testsignals (101, 102) ermittelt wird.

10

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die differentielle Phasenverschiebung wellenlängenmodulierter Testsignale zur Bestimmung der chromatischen Dispersion gemessen wird.

15

Zusammenfassung

Um die chromatischen Dispersion in einem optischen Übertragungssystem einstellen zu können, sieht die Erfindung
5 eine Vorrichtung vor, welche

-ein optisches Element (17) mit einer temperaturabhängigen chromatischen Dispersion, sowie

-eine Einrichtung (19) zur Einstellung einer Temperatur oder einer Temperaturverteilung zumindest eines Bereichs des

10 optischen Elements (17) zum Bereitstellen einer vordefinierten chromatischen Dispersion des optischen Elements (17) aufweist.

Fig. 1A

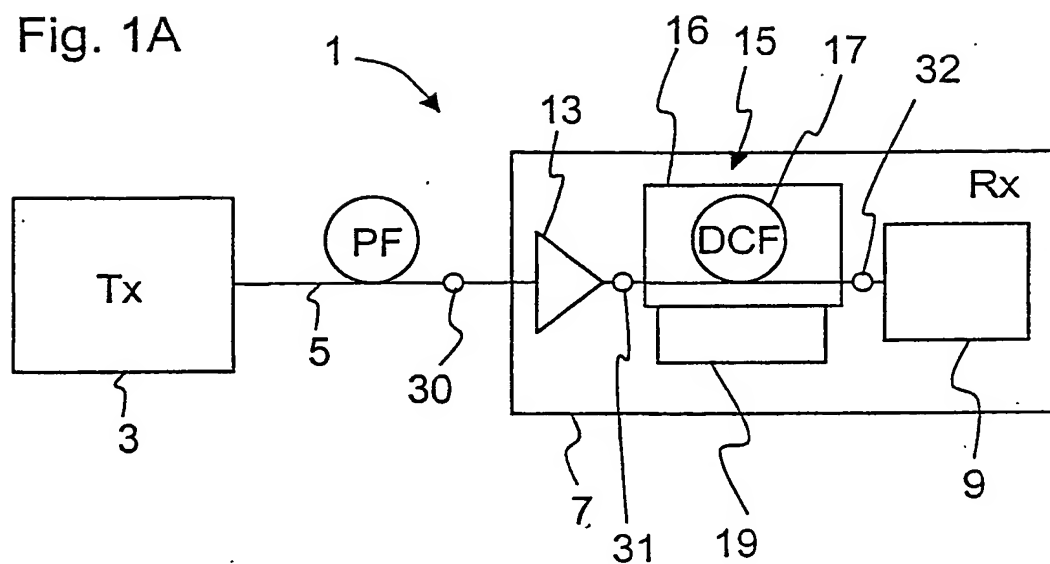


Fig. 1B

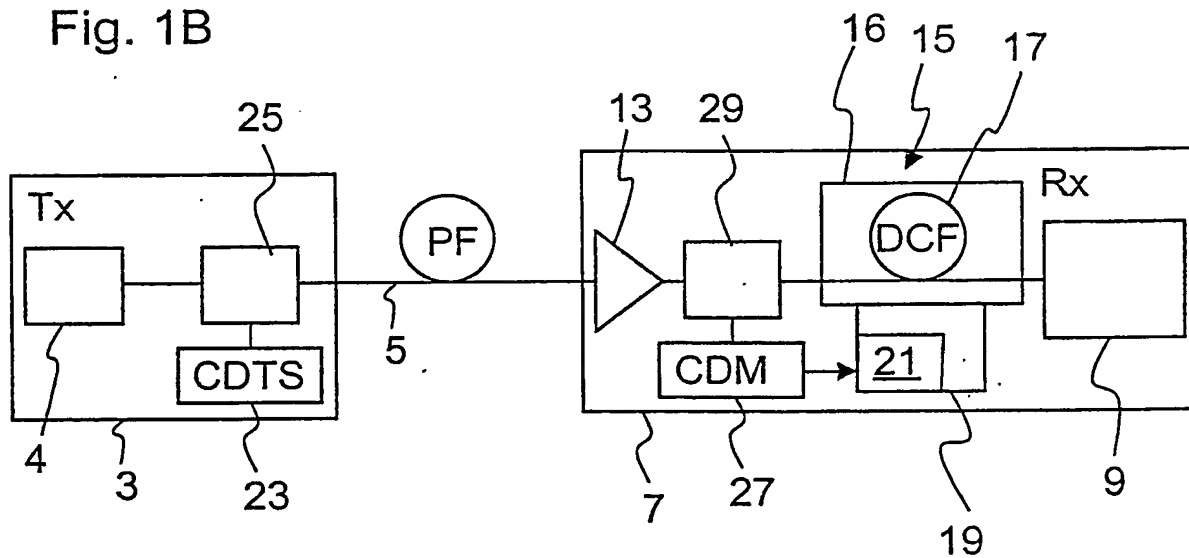


Fig. 1C

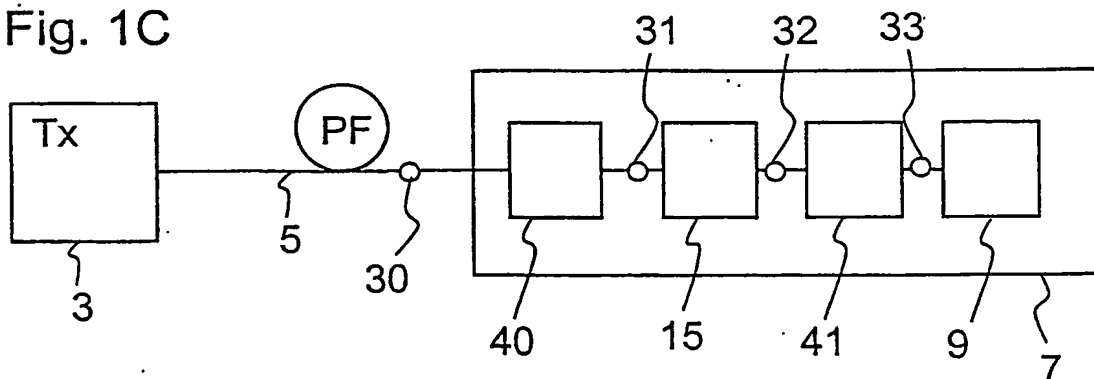


Fig. 2

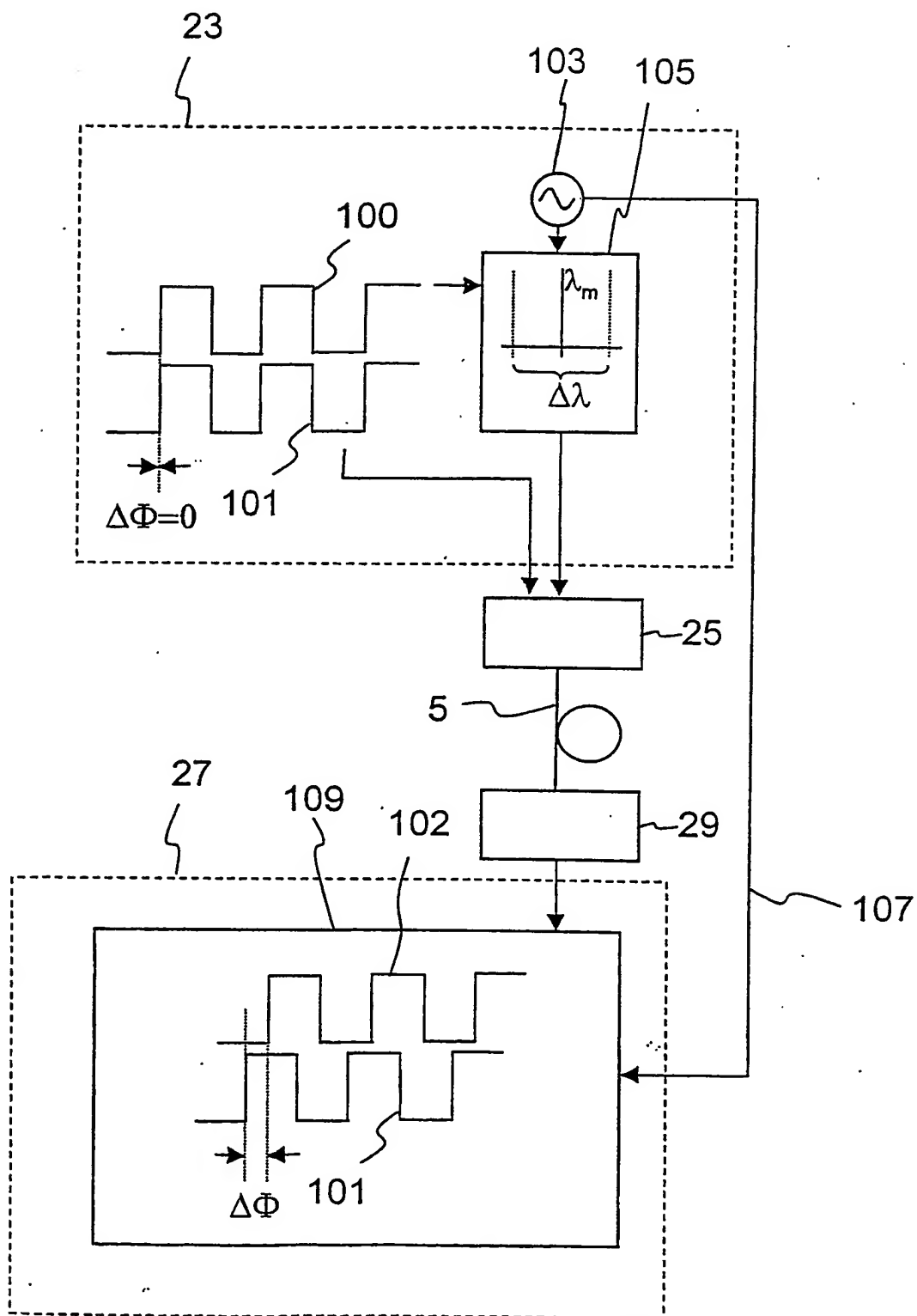


Fig. 3

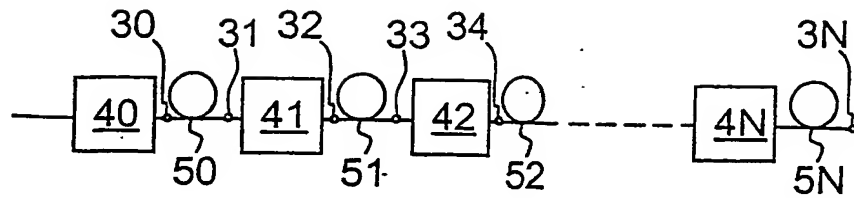


Fig. 4

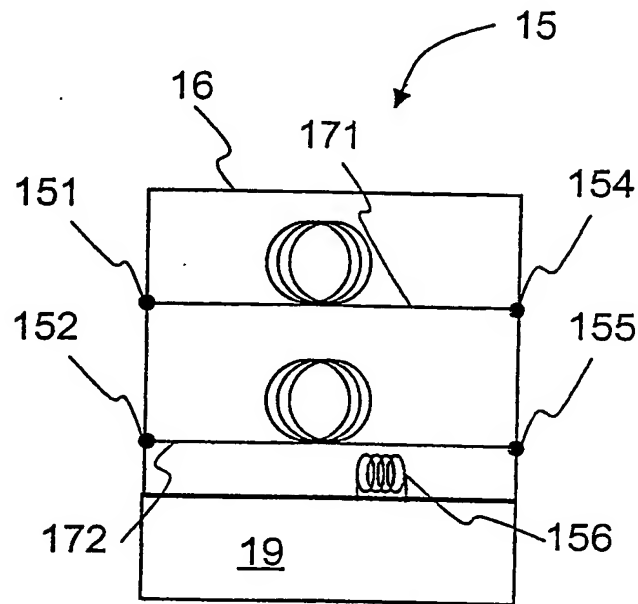


Fig. 5

